

POSIBLE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO DEL DRENAJE MINERO EN SIERRA ALMAGRERA (ALMERÍA)

Potential geothermal use of mine water drainage at Sierra Almagrera (Almería)

A. Navarro

Departamento de Mecánica de Fluidos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y Aeronáutica.
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Colón 7-11, 08222-Terrassa (España).
andres.f.navarro@upc.edu

RESUMEN

El desagüe minero de Sierra Almagrera (Cuevas del Almanzora, Almería) funcionó desde mediados del siglo XIX hasta 1958, permitiendo la explotación de unas minas de Pb-Ag que llegaron a tener una gran importancia en la minería española. Entre las instalaciones construidas destacan las de Brandt y Brandau, las cuales constituyeron un hito tecnológico a finales del siglo XIX. También se han analizado las características de las aguas termales que alimentaban el desagüe, así como su posible origen y aprovechamiento. Las características de los fluidos geotérmicos permitirían la producción de electricidad y/o el aprovechamiento de los mismos en un balneario o instalación similar.

PALABRAS CLAVE: Desagüe, Sierra Almagrera, aguas subterráneas, fluidos geotérmicos.

ABSTRACT

Mine dewatering in Sierra Almagrera (Cuevas del Almanzora, Almería) functioned from the mid-19th century until 1958, to enable extraction in the lead-silver mines which were very important in Spain. The considerable installations include those built by Brandt & Brandau, which were a technological landmark in the late 19th century. The characteristics of the thermal waters which fed the dewatering are also analysed, as well as their origin and potential use. The characteristics of these geothermal fluids could promote electricity production and/or their use in a spa or similar facility.

KEY WORDS: Dewatering, Sierra Almagrera, groundwater, geothermal fluids.

Recibido: 16 de mayo, 2018 • Aceptado: 22 de junio, 2018

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de la Minería a lo largo de la Historia ha sido el drenaje de las minas subterráneas, ya que sin la evacuación de las aguas de mina la explotación podía llegar a paralizarse o ser inviable la profundización de las labores. Así, Agricola (1556) indicaba que la excesiva entrada de agua en las minas era uno de los motivos más importantes para el abandono de los pozos y minas. Por ello y desde la Edad Antigua se implementaron en numerosas explotaciones diversos sistemas de bombeo que empleaban dispositivos

como las norias, tornillos de Arquímedes, sistemas manuales, etc. y que permitieron el drenaje de pozos a profundidades que superaban los 200m. En la Antigüedad y sobre todo en el mundo romano se emplearon con profusión tanto sistemas de bombeo como sistemas de drenaje por gravedad como son las galerías y socavones. Dichos sistemas de captación horizontal permiten un eficiente drenaje de las rocas permeables y saturadas de agua, habiéndose construido captaciones de hasta 2 km de longitud en España, Grecia y Eslovaquia (Younger et al., 2002).

Por todo ello, las minas explotadas a profundidades

elevadas han precisado, generalmente, para su funcionamiento de la existencia de algún sistema de bombeo (pozos y sondeos) o de drenaje por gravedad (galerías y socavones) que permitiese el acceso “seco” a las labores de extracción de los minerales. En ese sentido, cuando los caudales a extraer son muy importantes y la profundidad de elevación de los equipos de bombeo es alta, el coste económico suele ser muy elevado y hacer inviable la explotación económica del yacimiento. Éste es el caso de las antiguas minas de Sierra Almagrera (Cuevas del Almanzora, Almería), en las cuales la lucha por mantener secas las labores y el continuo descenso de los precios del plomo y de la plata desde finales del siglo XIX, llevó a la paralización de las labores subterráneas en 1957, después de un amplio periodo en el que se pusieron en marcha distintos sistemas de desagüe. Entre ellos, es preciso destacar el sistema de pozos y galerías implantado por Brant y Brandau en 1903, el cual constituyó un avance tecnológico en su época y que con algunas modificaciones ulteriores, funcionó desde 1948 hasta 1958, a cargo de la empresa pública “Minas de Almagrera, S.A.” (MASA), en el último periodo de explotación subterránea de los filones. En el caso de las minas de Sierra Almagrera, al hecho de tener que bombear continuamente grandes caudales, se le añadía la particular naturaleza de las aguas bombeadas, de carácter geotermal, y con temperaturas próximas a los 60 °C, en las zonas más profundas.

El bombeo de grandes volúmenes de agua subterránea mediante pozos de extracción y desde niveles profundos, requiere un alto consumo de energía y un constante mantenimiento de los equipos, creándose por la acción de los equipos de bombeo un cono de depresión en el acuífero, que lentamente deprime los niveles piezométricos. No obstante, al cesar el bombeo por cualquier razón, los niveles tienden otra vez a recuperarse, debiéndose desaguar toda el agua acumulada cuando se quiere continuar con la actividad minera.

La estructura geológica de Sierra Almagrera, que únicamente permitía la explotación subterránea de sus yacimientos minerales, y la existencia de un medio rocoso relativamente permeable a través de la red de fracturas existente y alimentado por aguas frías y también geotérmicas, explica la titánica lucha llevada a cabo por los mineros. Así, los distintos trabajos de desagüe desde 1847 hasta 1958, permitieron la existencia de una actividad extractiva que llegó a alcanzar relevancia a escala mundial, en algunos periodos, y que transformó de forma notable el entorno económico local y regional.

APROXIMACIÓN HISTÓRICA

Sierra Almagrera es una pequeña cadena montañosa costera de unos 12 km de longitud y apenas 3 km de anchura y que se ubica en el límite NE de la provincia de Almería (Fig. 1). Limita al norte con las estribaciones de la Sierra de los Pinos y del Aguilón, que constituyen su

prolongación hacia Murcia, donde se convierten en la Sierra de la Carrasquilla y finalmente en Sierra Almenara y Lomo de Bas. Sierra Almagrera limita al este con el mar Mediterráneo, desde donde ofrece un aspecto abrupto, a causa de la rápida elevación de sus relieves. Al oeste la sierra se encuentra con la rambla de Canalejas y del Arteal, afluentes del río Almanzora, quien constituye el límite natural entre Sierra Almagrera y Sierra de Almagro, la mayor elevación en la zona prelitoral.

La actividad minera en el sector de Sierra Almagrera se centró históricamente en la explotación de mineralizaciones hidrotermales de carácter filoniano, y de carácter estratoligado en las vecinas minas de Herrerías. Se trata de un conjunto de mineralizaciones pertenecientes al arco metalogénico Cartagena-Cabo de Gata, y de carácter epitermal en su mayoría. Dicha explotación ha sido muy dilatada a lo largo de la historia, encontrándose entre las más antiguas de la Península Ibérica (Siret, 1907; Cuadrado, 1947; Navarro et al., 1994a). En relación con la actividad minera romana y, posiblemente anterior, se encontraron numerosas huellas en Sierra Almagrera, al reiniciarse su explotación en el siglo XIX. En ese sentido, destaca el hallazgo de una galería romana horizontal cerca de la rambla del Arteal, que llegaba al llamado pozo de las Simas, así como vestigios de edificios, candiles y diversos depósitos de escorias mineras (Falces, 1883). En esta época la plata y el plomo se separaban por copelación, de forma similar a como se realizó durante buena parte del siglo XIX, generándose grandes volúmenes de escorias, en buena parte reaprovechados durante el siglo XIX, y que en Herrerías llegaron a suponer del orden de 276000 t (Ezquerria del Bayo, 1844).

Durante la época de dominación musulmana parece que la actividad minera se redujo a la mínima expresión, aunque se han encontrado algunos restos de esa época en la zona de Herrerías (Siret, 1907). De hecho, la actividad extractiva no vuelve realmente a retomarse hasta 1838, cuando se descubre, de forma más o menos fortuita, el llamado filón del Jaroso, descubrimiento cuyas vicisitudes han sido ampliamente descritas (Falces, 1883). Dicho filón, explotado inicialmente por las llamadas minas ricas (Carmen, Observación, Esperanza) llega a producir en el periodo 1839-43 unas 57.500 t de galena argentífera, a partir de una estructura bandeada que alcanzaba hasta 12 m de potencia en algunos puntos. Tan elevada producción de un mineral que llegaba a contener varios kg de plata por tonelada, produjo un fenómeno singular de febril actividad minera, al que se asoció un proceso “especulativo” de alcance internacional (Ferré, 1979; Sánchez Picón, 1983, 1992). Como resultado de toda esta actividad llegaron a abrirse hasta 1700 pozos mineros y a registrarse más de 200 sociedades, muchas de las cuales nunca llegaron a extraer ningún mineral. Un hecho significativo que refleja la potencia del fenómeno minero de Sierra Almagrera, es que a mediados del siglo XIX, algunas de las acciones más cotizadas de la Bolsa de Madrid correspondían a la mina Carmen (Navarro, 2010).

La explotación minera en Sierra Almagrera, durante el siglo XIX, presenta dos épocas claramente

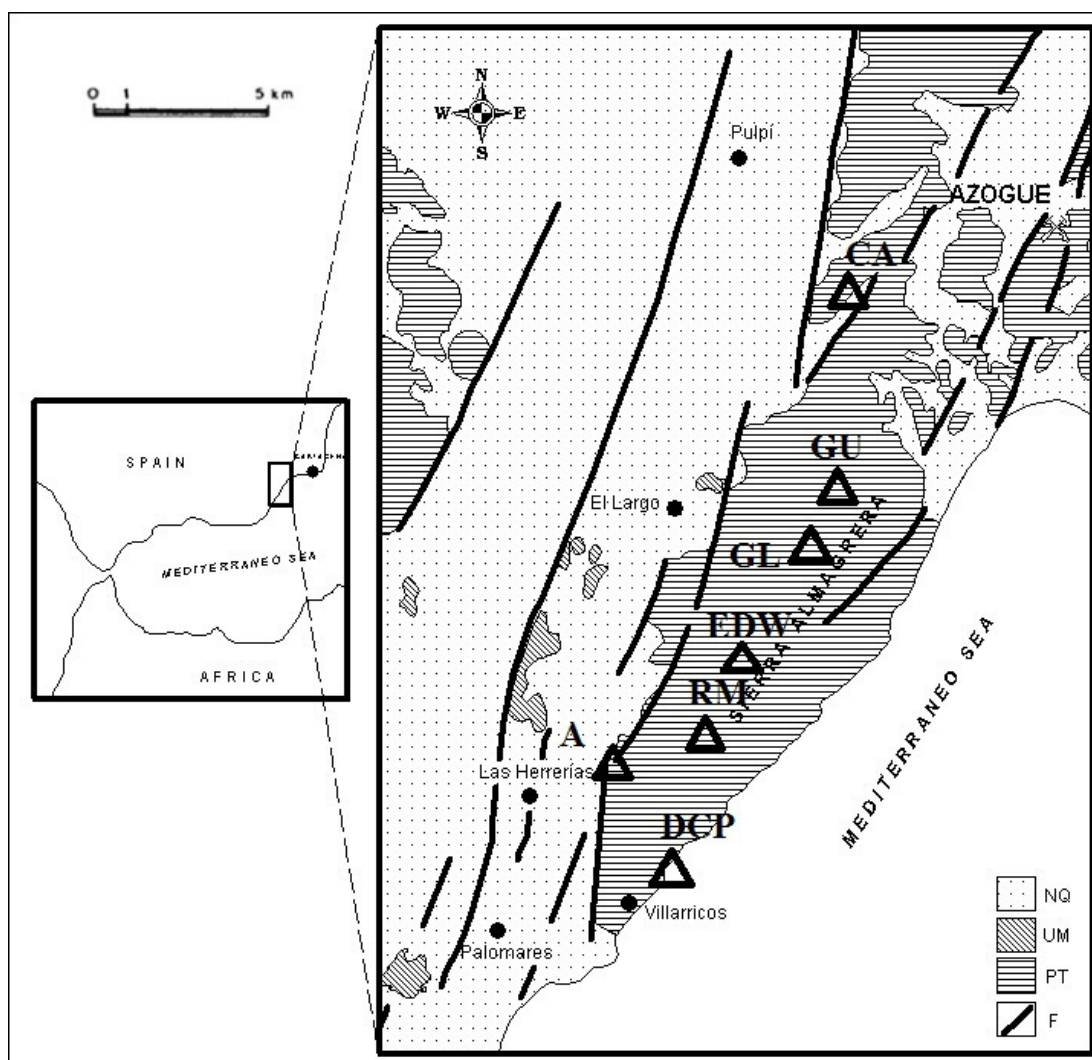


Figura 1. Mapa geológico general de la zona donde se ubican las minas de Sierra Almagrera al NE de la provincia de Almería. NQ: Cuaternario y Terciario, UM: vulcanitas neógenas, PT: zócalo metamórfico Nevado-Filábride y Alpujárride, F: fallas principales. A: Sistema de desagüe de El Arteal (muestras A4 a A7, A18 a A20). EDW: Pozo experimental construido por Peñarroya-España en 1983 (muestras A24 a A38). DCP: Sondeo costero construido en 2009. GL: Pozo de la mina "Gloria" (muestra A22). GU: Pozo de la mina "Guzmana" (muestras A12 a A15 y A21). RM: Pozo de la mina "Ramo de flores" (muestras A8 a A11 y A23).

Figure 1. Simplified geologic map where are located the Sierra Almagrera mines at NE Almería. NQ: Neogene and Quaternary sediments, UM: Volcanic neogenic rocks, PT: Metamorphic basement (Nevado-Filábride and Alpujárride complexes), F: Main fractures. A: Arteal mine dewatering system (A4 to A7, A18 to A20 samples). EDW: Experimental deep well built by Peñarroya-España in 1983 (A24 to A38 samples). GL: "Gloria" mine shaft (A22, A40 samples). GU: "Guzmana" mine shaft (A12 to A15, A21 samples). RM: "Ramo de flores" mine shaft (A8 to A11, A23 samples).

contrapuestas, y marcadas por la aparición del agua subterránea en los pozos más profundos del barranco del Jaroso en 1844, y que obligó al desagüe de las labores para poder mantener la actividad extractiva. En una primera fase, y hasta la década de 1880, los distintos sistemas de desagüe, los nuevos descubrimientos y la introducción de maquinaria moderna de extracción, consiguen que la producción minera se mantenga, más o menos, estable, llegándose a cifras notables en relación con la producción nacional (Fig. 2). No obstante, a partir de 1886 el problema del desagüe y la existencia de un "minifundio" minero generalizado, que impide racionalizar los costes de producción, provocan una serie de crisis, acentuadas por la progresiva bajada del precio del plomo y de la plata, que acompañarán a la minería de Sierra Almagrera hasta 1936 (Navarro, 2010).

Los principales hitos relacionados con el desagüe minero aparecen resumidos en la Tabla 1, destacando

sobre todas las actuaciones realizadas la puesta en marcha del sistema de bombeo de Brandt y Brandau en 1903 (Fig. 3), que posibilitaría el descenso de los niveles piezométricos a cotas próximas a los 150m bajo el nivel del mar. Sin embargo, numerosas explotaciones se paralizaron antes de alcanzar dicha profundidad, y por tanto dejaron amplias zonas vírgenes por explotar. El todavía visible desagüe de Brandt y Brandau (Fig. 3 y 4) se empezó a construir en 1894 a partir de dos pozos (Encarnación y Jaulas) situados a 19m de distancia, aproximadamente, y emplazados sobre los sedimentos neógenos en el paraje del Arteal, al pie de la Sierra y a diferencia de lo que había sucedido con los anteriores desagües (pozo Constancia en barranco del Jaroso y pozo San Juan en el barranco Francés).

El plan general del desagüe consistía en los dos pozos anteriormente citados, de forma que el pozo Encarnación comunicaba con la galería de aguas que drenaba el agua

de la Sierra, y el pozo Jaulas comunicaba con la sala de máquinas. Dicha sala o “anchurón” de máquinas se abrió a 120 m de profundidad, consistiendo en un cilindro horizontal de 6 m de diámetro y 17 de longitud, revestido de un anillo de mampostería de 0.6 m de espesor. Este anchurón se hallaba dividido horizontalmente por un piso, sobre el que descansaban las máquinas y bombas del desagüe (Fig. 4), hallándose ocupada la bóveda inferior con los cimientos, tuberías de vapor y agua, válvulas y demás accesorios (Souviron, 1898).

Para captar el agua subterránea se construyó una galería de desagüe de dirección W-E, que cortaba distintas fracturas o “soplados”, obligando a la perforación de un pozo de ventilación, llamado pozo “Lumbrera”, a unos 180 m, aproximadamente, del inicio de la galería (Fig. 3). La presencia de una fractura o “quebrada” muy rica en agua y situada a unos 405 m de la entrada de la galería impidió la progresión de la misma hacia el interior de la Sierra, quedando finalmente con dicha longitud.

Posteriormente (Noviembre de 1903), se hizo cargo del desagüe la Compañía Minera e Industrial para España, constituida en Bruselas, cuando las aguas subterráneas se situaban a unos 95 m de profundidad bajo el nivel del mar,

medidos en el pozo Casualidad, situado a unos 400 m del pozo Encarnación. El objetivo de este nuevo intento de desagüe se centraba en alcanzar un nivel del agua situado a unos 220 m bajo el nivel del mar, para lo cual se reprofundizaron los pozos Encarnación y Jaulas, que inicialmente tenían sus calderas a 139 y 130m de la superficie, hasta los 257 y 250 m, respectivamente, y que correspondían a los 227 y 220 m bajo el nivel del mar. Se trata de dos pozos circulares de 3.2m de diámetro (Fig. 3), a los que se unió el pozo Ana, gemelo del Encarnación y que también se reprofundizó hasta los 250 m, empleándose para la ventilación y la salida del escape de vapor de las máquinas (Gómez Iribarne, 1908). Con esta nueva configuración del sistema de desagüe, se construyó un nuevo “anchurón” para las máquinas a 220 m bajo el nivel del mar y al Oeste del pozo Encarnación, así como unas nuevas galerías de desagüe en dirección a la Sierra, situadas, también, a 220 m bajo el nivel del mar.

Dichas galerías de desagüe distaban 8 m entre sí en sentido horizontal y 2.5 m en sentido vertical, penetrando 332 m en la Sierra, en dirección Este, aproximadamente. En el interior de las galerías existían diversos diques con compuertas de hierro, capaces de resistir una presión de



Figura 2. Mina Encantada: Castillete, máquina de vapor y sistema de extracción de minerales.
Figure 2. Encantada mine shaft, steam machine and mineral extraction system.

famoso socavón de Sta. Bárbara de 4123 m de longitud, el conjunto de 212 viviendas conocidas como “Korea” y dos centrales térmicas en el Arteal y Villaricos con una potencia conjunta de 1900 kw, llegándose a un total de 1154 personas empleadas en las diversas instalaciones de MASA en 1954 (Navarro, 2010).

Sin embargo, nunca llegaron a construirse las instalaciones de desagüe proyectadas a 330 y 400 m bajo el nivel del mar, y que eran necesarias para poder obtener las 360.000 t de concentrados de Pb, previstas en los estudios iniciales. De hecho, la explotación subterránea de las minas se abandonó en 1957, y en 1958 cierra MASA sus instalaciones de Sierra Almagrera, suspendiéndose definitivamente el desagüe. El abandono de la explotación pudo deberse a la caída en los precios del Pb y Ag, a la exigua potencia de las mineralizaciones de galena en profundidad (2 cm) y al empobrecimiento de los filones con la profundidad que pasaban a estar constituidos de forma dominante por calcopirita, pirita y siderita, tal y como ha sucedido en yacimientos similares.

Desde entonces y hasta la actualidad (2018), los niveles piezométricos han ido ascendiendo paulatinamente, hasta acercarse a niveles próximos al del mar y ocupando buena parte de las labores mineras que durante tantos años fueron objeto de una constante lucha por mantenerse libres del agua subterránea.

En cuanto a la actividad minera extractiva, ésta prosiguió a partir de 1969 y hasta 1991, cuando diversas empresas privadas procedieron al beneficio de las antiguas escombreras, incluyendo su tratamiento por flotación en la planta del Arteal. También, en la década de 1980 la conocida y desaparecida empresa minera “Peñarroya” rehabilitó la galería del “socavón” o Sta. Bárbara y estudió la posibilidad de explotar los altos contenidos en Li que presentan las aguas termales, aunque finalmente no se llegó a materializar ningún proyecto industrial.

MARCO FÍSICO: GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Geología

Sierra Almagrera se sitúa en el seno de las Cordilleras Béticas, y está asociada a las llamadas Zonas Internas o Dominio de Alborán, constituidas mayoritariamente por rocas paleozoicas y mesozoicas afectadas por el metamorfismo. En sus bordes W y NW afloran los materiales sedimentarios de la depresión de Vera, que está conformada por una potente cuenca sedimentaria rellena por sedimentos neógenos y cuaternarios, que continúa por el Norte hasta entroncar con la cubeta sedimentaria de Pulpí (Fig. 1). En esta región también existen diversos afloramientos de rocas volcánicas, de edad Mioceno Superior, incluidas tanto entre las rocas del basamento bético, como entre las rocas sedimentarias que rellenan las cuencas (Barragán, 1993).

El núcleo fundamental de Sierra Almagrera está constituido por el conjunto litológico inferior del dominio bético, llamado Complejo Nevado-Filábride (Booth-Rea et al., 2004). Sobre este complejo se sitúa el llamado

Complejo Alpujárride, que aflora junto a Villaricos y en la Sierra de los Pinos y Sierra del Aguilón, que son la continuación natural de Sierra Almagrera hacia el Norte. Estos materiales son, fundamentalmente, esquistos negros y cuarcitas con potencias superiores a los 800 m, metavulcanitas intercaladas y mármoles micáceos negros situados en la parte más alta de la serie. Este conjunto metamórfico se asimila a la unidad Nevado-Filábride del Lomo de Bas o unidad Calar Alto. La edad atribuida al conjunto es Paleozoico, siendo los mármoles del Devónico Medio (Barragán, 1993).

Los materiales del Complejo Alpujárride en esta zona están constituidos por filitas y esquistos grafitosos, presentando potencias mucho menores que los del Complejo Nevado-Filábride, subyacente. Discordantes sobre los anteriores se sitúan los materiales sedimentarios neógenos que rodean Sierra Almagrera. Sobre los depósitos sedimentarios miocenos se sitúan los depósitos aluviales cuaternarios, formados por bloques, cantos, gravas y arenas resultantes de la erosión de los relieves circundantes. Ocupan las ramblas y lechos de los ríos actuales y también pequeñas terrazas irregularmente distribuidas, asociadas al río Almanzora y a las ramblas que desembocan en él, como la Rambla de Canalejas.

En cuanto a la estructura actual de los materiales, ésta parece controlada por una serie de fracturas posteriores a la disposición de los mantos, y que en este sector son un sistema de fracturas de dirección N 65 °E, y otro de dirección N 15-20 °E, paralelo al desgarre de Terrenos y a la falla de Palomares. Condicionado por los sistemas de fracturación, el vulcanismo neógeno aflora en Sierra Almagrera (Cala Panizo, Pozo del Esparto) y en áreas cercanas (isla Negra y de Terreros), así como en varias zonas de la Cuenca de Vera y Depresión de Pulpí (Cerro Colorado, Alifraga, Guazamara, etc.).

Mineralizaciones explotadas

Los filones de Sierra Almagrera han sido ampliamente descritos en numerosas publicaciones del siglo XIX, y que siguen siendo de gran interés, dados los escasos afloramientos existentes de las mineralizaciones filonianas. En la actualidad únicamente son visibles algunas fisuras rellenas de galena, barita y siderita, sobre todo en el interior del socavón Sta. Bárbara, y algunas monteras oxidadas en determinadas zonas de la Sierra.

Los filones de Sierra Almagrera se caracterizan por presentarse en forma de estructuras orientadas en dirección N-S y NW-SE, y por haber mostrado espesores notables, fundamentalmente en el caso del filón del Jaroso, con potencias que en este caso eran del orden de 3-7m, aunque en ocasiones se encontraban ensanchamientos y bolsadas que alcanzaban los 12-14m. El conjunto de filones explotados fue de unos 50, aproximadamente, y mediante un gran número de concesiones, de forma que un solo filón era, habitualmente, explotado por diferentes empresas mineras. La mayor parte de los filones explotados eran estructuras bandeadas, que presentaban una serie de fajas paralelas a los hastiales del filón y constituidas por óxidos

Periodo	Sucesos destacables relacionados con el desagüe
1844	Aparición del problema en profundidad (150-200 m)
1847	Aparición del agua en las minas (cota 160 m, aproximadamente)
1849	Inicio del socavón Riqueza Positiva*
1851	Instalación de una máquina de vapor (100 CV) en la mina Constancia
1852	Parada de la máquina de vapor (9 de Julio)
1856-1857	2º Periodo de funcionamiento de la máquina Constancia
1858-1866	Desagüe de Orozco y Cía. (140 CV)
1866-1872	Trabajos de la “Unión Desagüadora”. Finalización del socavón Riqueza Positiva (1868)
1872-1875	Arriendo del desagüe a capitalistas franceses
1875-1877	Trabajos de la empresa “Sociétés Anonyme de plombs argentifères Almagro y Almagrera” (máquina de 300 CV)
1877-1879	Trabajos de la empresa “Compagnie Minière de la province d’Almería”
1879-1881	Parada del desagüe
1881-1886	Asume el desagüe la empresa “Compagnie d’Aguilas” (posteriormente Peñarroya). Nuevo pozo de desagüe en el barranco Francés (mina Crescencia, 1884).
1886-1894	Parada del desagüe. Creación del Sindicato Minero de Sierra Almagrera (1889).
1894-1903	Construcción y explotación del sistema de desagüe de Brandt y Brandau (pozos Encarnación y Jaulas en El Arteal). Las calderas de los pozos se situaban a 139 y 130 m de profundidad, respectivamente.
1903-1912	Traspaso del desagüe a la casa Figueroa (Compañía Minera e Industrial de España). Inicio del desagüe en 1906. Profundización de los pozos Encarnación y Jaulas hasta los 227 y 220 m bajo el nivel del mar, respectivamente. Descenso del nivel piezométrico en el Jaroso hasta la cota 146.15 m bajo el nivel del mar (1908).
1912	Paralización del desagüe
1913-1914	Contrato de desagüe a la Sociedad Española de Industrias Mineras
1916-1920	Constitución del Desagüe de Sierra Almagrera
1920-1924	Paralización del desagüe
1924-1932	Traspaso del desagüe a la Sociedad Minera de Almagrera y Consorcio de Almagrera.
1932-1936	Desagüe a cargo de “Empresas Eléctricas e Industriales S.A.”. Bombeo gracias a la central eléctrica de Villaricos. Descenso del nivel piezométrico en El Arteal-Bco. Francés, hasta la cota 158.8 m bajo el nivel del mar (1935).
1945	Constitución de Minas de Almagrera S.A. (MASA)
1949-1958	Reconstitución del Sindicato de Mineros (1948) y reanudación del desagüe. Descenso del nivel piezométrico en El Arteal, hasta la cota 200 m bajo el nivel del mar (1955).
1958	Paralización definitiva del desagüe
1981-86	Sondeo de investigación y ensayos de bombeo por Peñarroya-España. Niveles piezométricos estáticos a 49-50 m bajo el nivel del mar.
2010	Nivel piezométrico en la mina Guzman a 39 m, aproximadamente, bajo el nivel del mar.
2018	Nivel piezométrico próximo a la cota del nivel del mar en El Arteal.

* Galería de desagüe que acabó conectando el drenaje del Jaroso con la cala del Peñón Cortado

Tabla 1. Principales hitos en el desagüe de Sierra Almagrera. Modificado de Navarro (2010).
 Tabla 1. Principales hitos en el desagüe de Sierra Almagrera. Modificado de Navarro (2010).

de hierro, barita, galena argentífera, siderita y galena “hojosa”, poco argentífera. Una de las mejores descripciones de la estructura de los filones corresponde a la realizada por Ezquerro (1844) para el filón del Jaroso, siendo la que se reproduce a continuación:

“La masa del filón está compuesta de una porción de sustancias diferentes, alguna de ellas metalíferas y otras que no lo son, conteniendo también grandes trozos del mismo esquisto que constituye la caja del criadero. Las sustancias

metalíferas son galena hojosa en palmas, galena de grano fino cuasi compacta, cobre gris, óxidos de hierro y de manganeso, arseniuros de plata y de plomo, y otras varias combinaciones de todos estos metales, que exigirían análisis muy delicados para determinarlas. Las sustancias no metalíferas son la barita y el yeso. Todas estas sustancias se presentan formando fajas o zonas más o menos anchas siguiendo la inclinación del filón, es decir paralelamente a sus salbandas, las cuales en general están constituidas por óxidos de hierro. Por el medio del filón corre cuasi sin interrupción un soplado o grieta irregular, en cuyas caras o labios no se han visto hasta ahora más cristalizaciones que de barita, de yeso y de manganeso. La galena tanto la hojosa como la compacta y el cobre gris, son esencialmente argentíferos. Ensayando trozos escogidos de estas tres clases de mineral, han dado, según dicen, un gran contenido en plata, hasta el 1.5 por 100 en la galena compacta; pero en los ensayos que yo he hecho al soplete solo he obtenido de la galena hojosa 6 a 7 onzas de plata por quintal de mineral, de la compacta 12 onzas”.

La estructura bandeada del filón Jaroso se reproducía en casi todos los grandes filones (filón Guzmaná, Medio Mundo, Ramo de Flores, etc.), presentando la mayor parte de ellos el hecho de no aflorar en superficie, así como un paulatino descenso del contenido metálico, fundamentalmente plata, con la profundidad (Gómez Iribarne, 1908) y también en su potencia en galena. Esta diferenciación en profundidad del relleno filoniano ya fue detectada durante la explotación, encontrándose en la parte más alta de los filones: óxidos, sulfatos, hidroxisulfatos, oxi-hidróxidos de Fe y Mn (Souviron, 1898) y minerales de Ag (clorargirita, óxidos de Fe argentíferos, etc.) que hacían que la riqueza argentífera de los filones en su parte superior fuera muy alta.

En su zona intermedia los filones presentaban cantidades variables de barita, siderita y galena, más o menos argentífera, junto con otros minerales de carácter minoritario como la piritita, marcasita, tetraedrita, esfalerita y calcopirita, fundamentalmente. En relación con la galena, ésta se presentaba bajo diversas formas y texturas, entre las que podemos señalar:

- Galena en filones brechoides con cuarzo.
- Galena compacta de grano fino, muy argentífera.
- Galena “hojosa” poco argentífera.

En general, en los filones las proporciones de los diferentes minerales era muy variable, ocupando la galena una pequeña parte del relleno filoniano, que en las últimas fases de la explotación alcanzaba un espesor medio de 2.5cm (INI, 1951). Cuando los filones alcanzaban una cierta profundidad (>100 m bajo el nivel del mar), se estrechaban notablemente, reduciéndose el relleno filoniano a siderita y calcopirita como minerales dominantes.

Desde el punto de vista de la tipología de yacimiento, los filones de Sierra Almagrera han sido considerados siempre como mineralizaciones de carácter hidrotermal (De Sierra, 1928, Martínez et al., 1989, Martínez, 1991;

Navarro et al., 1994a, 1994b, 1997, 1998, 2004, 2008, 2009), es decir, formados por la acción de aguas termales, que depositaban los minerales en los huecos existentes en el medio rocoso a causa de la fracturación, y de forma análoga a como sucede en muchos campos geotérmicos actuales. Así, se considera que el sistema filoniano de Sierra Almagrera es de carácter “epitermal” y de “sulfuración intermedia” (Camprubí y Albinson, 2006), con características similares a los existentes en México y otras zonas del mundo, donde han existido márgenes continentales activos. Los depósitos epitermales se han formado en zonas próximas a la superficie terrestre (hasta 1-2 km de profundidad) y por la acción de fluidos hidrotermales de temperaturas relativamente bajas (150-300 °C) y con influencia de una actividad ígnea, más o menos profunda.

Hidrogeología

Desde un punto de vista hidrogeológico, Sierra Almagrera se comporta como un medio poco permeable, aunque el conjunto de fracturas que afectan a los materiales metamórficos (esquistos y filitas) permiten el flujo de agua subterránea, que fue preciso controlar durante la vida activa de las minas. En algunos casos, las fracturas que existen en la Sierra y que constituyen, cuando están rellenas por sulfuros, los filones explotados, presentaban la existencia de los llamados “soplados”. Dichos “soplados” eran oquedades relativamente grandes, abiertas dentro de la caja del filón, por donde encuentran fácil circulación las abundantes aguas que invaden todos los huecos de la formación rocosa (Gómez Iribarne, 1908).

En definitiva, el conjunto de la Sierra se comporta como un sistema únicamente permeable por fracturación, constituyendo el conjunto de fracturas y fisuras un medio interconectado que permite un flujo importante de agua subterránea, buena parte de la cual es de origen termal, tal y como se verá a continuación (Fig. 5). A pesar de que los medios fracturados suelen ser fuertemente heterogéneos y presentan valores relativamente bajos de conductividad hidráulica y transmisividad, los valores proporcionados por datos históricos de caudales de bombeo y descensos de nivel piezométrico, medidos en varios puntos, permiten estimar una transmisividad macroscópica comprendida entre 162 y 659 m²/día.

En cuanto al origen de las aguas termales, ha existido una gran polémica durante muchos años (Souviron, 1898; Gómez Iribarne, 1908). En general, los datos históricos (De Sierra, 1928) indican que el sistema de bombeo proporcionaba un fluido muy salino (residuo seco: 30 g/l), y cuya temperatura alcanzaba los 55°C a profundidades próximas a los 200 m bajo el nivel del mar. Los datos hidrogeoquímicos históricos y obtenidos en distintas campañas de muestreo (Tablas 2 a 4) indican que las aguas termales, además de presentar temperaturas superiores a los 50 °C, son de carácter clorurado sódico-cálcico, y bastante más salinas que el agua del mar. Otras características interesantes de las aguas termales de la

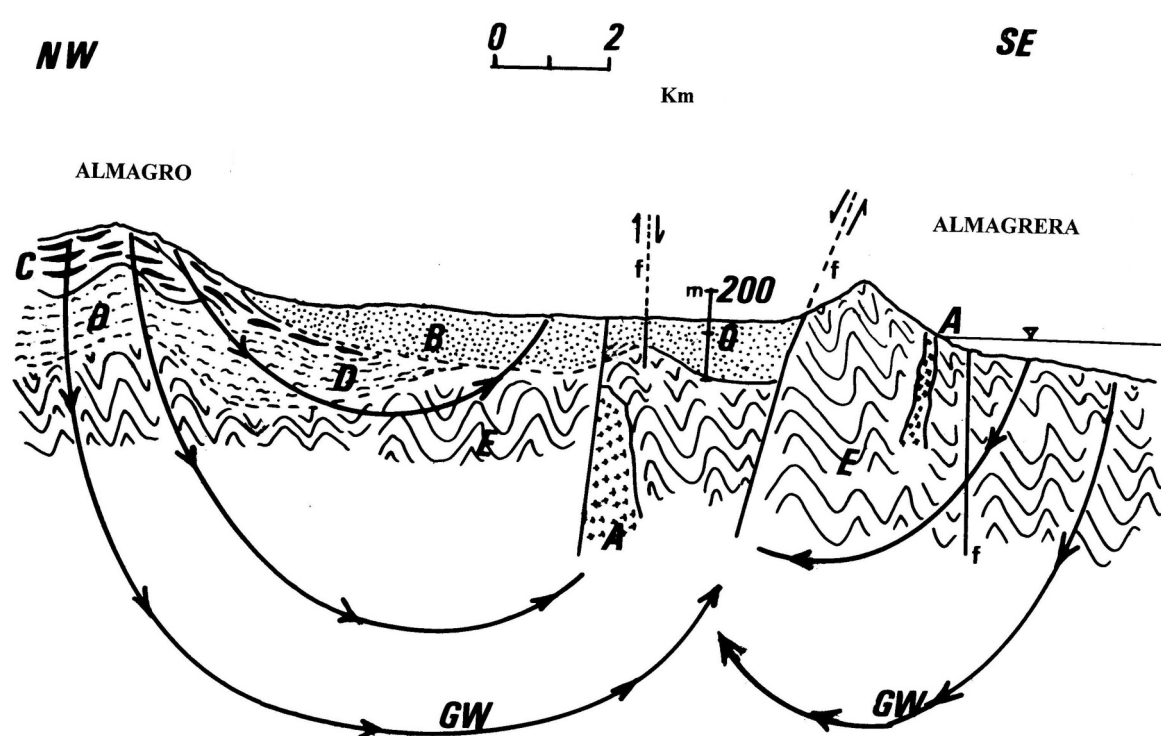


Figura 5. Esquema hidrogeológico general. A: Rocas volcánicas (Neógeno). B: Sedimentos neógenos y cuaternarios. C: Complejo Alpujárride. D: Unidad Bédar-Macael (Complejo Nevado-Filábride). E: Unidad de Calar Alto (Complejo Nevado-Filábride). GW: Flujo regional de aguas subterráneas. PF: Falla de Palomares. Figure 5. General hydrogeologic section. A: Volcanic rocks (Neogene). B: Neogene-Quaternary sediments. C: Alpujárride complex. D: Bédar-Macael unit (Nevado-Filábride complex). E: Calar Alto unit (Nevado-Filábride complex). GW: Regional groundwater flow. PF: Palomares Fault.

Parámetro		A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15
Nivel piezométrico (m)		- 75	- 122	-167	-212	-86	-118	-137	-164	-78	-98	-126	-150
pH, T (°C)		7.3 33	6.8 33	6.9 33	6.8 33	3.6 35	4.34 34	3.6 34	3.6 34	2.9 30	2.9 28	2.9 32	3.0 32
Salinidad (g/L) (110°)		10340	10260	10210	10410	38550	38870	40460	38920	24670	25130	29560	34080
Salinidad (g/L) (160°)		6260	7120	5890	6950	2960	2691	2847	2956	1768	1723	2078	2288
CCl	mg/L	3430	3342	3410	3094	1725	1745	1711	1643	8593	8252	1016	1091
SO ₄		3250	2750	3275	3575	4225	4075	4300	4300	7825	7575	8500	8600
HCO ₃		271	277	283	265	0	0	0	0	0	0	0	0
Br		4.65	2.85	3.9	4.45	3.25	3.05	3.05	3.7	2.45	1.8	2.8	2.35
Si		4	3	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ca		616	608	648	624	1488	1480	1400	1568	312	240	400	376
Mg		267	282	282	272	1026	1075	1035	1021	1249	1244	1307	1589
Na		2650	2450	2450	2450	9750	8950	9150	8586	4300	4450	5350	6500
K		141	147	134	119	690	630	670	570	187	197	228	350
Li		5.5	5.5	6	5.5	27	27.5	27	26.3	13.2	13.2	16.7	18.7
Fe		0.2	0.5	1.9	0.7	157	119	206	216	1270	1400	1250	1610

Tabla 2. Datos hidrogeoquímicos de Mayo de 1971 del desagüe de El Arteal (A4 a A7), Pozo Ramo de Flores (A8 a A11) y pozo Guzmán (A12 a A15). (Obtenidos de Navarro y Carulla, 2018).

Tabla 2. Datos hidrogeoquímicos de Mayo de 1971 del desagüe de El Arteal (A4 a A7), Pozo Ramo de Flores (A8 a A11) y pozo Guzmán (A12 a A15). (Obtenidos de Navarro y Carulla, 2018).

Parámetro		A18 (*)	A19 (*)	A20(*)	A21(1)	A22(2)	A23(3)
Nivel piezométrico (m)		-71.3	-121.3	-171,3	-149.5	-96.5	-144
Temperatura		32 °C	32.5 °C	35 °C	46 °C	44.5 °C	46.5 °C
Cl	mg/L	3600	3600	3800	7600	10400	13200
SO ₄		2595	2400	2500	6720	8300	4180
F		1.8	3.6	2.1	3.4	4.2	3.9
Si		5.25	6.0	1.7	1	1	1.4
Ca		610	630	830	750	1700	660
Mg		290	290	1180	890	800	300
Na		1800	2100	1700	16600	6000	7500
K		140	160	160	265	470	565
Li		6.8	6.8	6.4	12	20	20
Fe		1	1.78	17.2	1580	1990	398
Mn		15	1	1	380	600	250
Zn		1.6	1.2	2.3	460	360	130
Cu		1.5	1.8	1.7	12	1	1.4
Ba	µg/L	15	18	18	12	15	14
Pb		50	50	50	3500	3000	4000
Ti		50	50	50	50	50	50
Zr		50	50	50	50	50	50
P		50	50	50	50	50	50
As		55	55	55	350	200	400
Ni		50	60	60	1200	1000	11400

Tabla 3. Datos hidrogeoquímicos de 1973 de (*) El Arteal. (1) Pozo Guzman, (2) Pozo Gloria, (3) Pozo Ramo de Flores. Obtenidos de (Navarro y Carulla, 2018).
 Tabla 3. Datos hidrogeoquímicos de 1973 de (*) El Arteal. (1) Pozo Guzman, (2) Pozo Gloria, (3) Pozo Ramo de Flores. Obtenidos de (Navarro y Carulla, 2018).

Sierra, son la presencia de elevadas concentraciones de algunos metales como Li, Fe y Mn, y unas relaciones iónicas diferentes a las del agua marina.

Los análisis químicos de las muestras indican una facies dominante clorurada sódico-cálcica, con un contenido de cloruros que alcanza 59,3 g / l, por encima de los valores detectados en el mar Mediterráneo (tablas 2-4). Las aguas termales muestran también concentraciones muy altas de Na (28 g / L), K (1.7 g / L), Ca (7.2 g / L), Mg (0.63) g / L y Li (65 mg / L). Además, se detectaron concentraciones elevadas de metales en los pozos de minas antiguos (Tabla 3), que muestran altas cantidades de Fe (1990 mg / L), Mn (600 mg / L), Zn (460 mg / L), Pb (4 mg / L) y Ni (11.4 mg / L), debido a la movilización de los metales procedentes de la mineralización filoniana, por oxidación de los sulfuros

y disolución de sales eflorescentes. La alta salinidad del agua subterránea junto con los procesos de oxidación pueden explicar la presencia de cantidades altas de metales en las aguas subterráneas, debido al aumento de la solubilidad asociada con una fuerza iónica elevada. Además, las muestras de agua termal presentan relaciones Cl / Br superiores a las del agua de mar, lo que indica que la alta salinidad no puede ser debida al agua marina, o en caso de una posible mezcla ésta estaría en una baja proporción..

El origen de la alta salinidad de las aguas termales podría deberse a la disolución de halita o la dilución de salmueras procedentes de evaporitas ricas en halita. De hecho, las unidades asociadas al “complejo Alpujarride” (Fig. 5) muestran dos secuencias de evaporitas de 600 y

Parámetro		A24	A25	A26	A27	A29	A30	A38
Día		18-01	23-01	28-01	1-02	11-02	3-03	23-03
Nivel piezométrico (m)		-176.8	-173	-173	-183	-185	-195	-195
Descenso (m)	m	7	3	3	13	15	25	25
Temperatura	°C	51	51	51	51	51	51	51
FR	L/s	15	15	15	30	30	30	45
TDS	g/l	103	103	103	102	103	102	100
pH		6.8	6.9	6.9	6.7	6.8	6.8	6
C l	g/L	58.9	59.3	59.6	57.9	58.2	57.9	57.5
SO ₄		0.82	0.89	0.95	0.87	0.85	0.84	1.01
HCO ₃		0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Na		28.2	28.0	28.0	28.2	28.0	28.0	27.4
K		1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7
Ca		7.2	7	7.1	7.2	7.0	7.1	6.8
Mg		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Li	mg/L	65.0	65.0	65.0	64.3	64.5	64.5	66
Rb		17	17	17	17	18	17	17
Sr		275	275	270	275	275	270	260
Fe		48	47	32	45	47	32	33
Zn		2	1	1	1	1	1	1
Si		6.5	5	5	5.5	5.3	6.5	7.1

Tabla 4. Datos hidrogeoquímicos de algunas muestras termaleras representativas procedentes del pozo experimental excavado en 1983. FR: caudal, TDS: total de sólidos disueltos. Modificado de Navarro y Carulla (2018).

Tabla 4. Datos hidrogeoquímicos de algunas muestras termaleras representativas procedentes del pozo experimental excavado en 1983. FR: caudal, TDS: total de sólidos disueltos. Modificado de Navarro y Carulla (2018).

200 m de espesor, respectivamente, dominadas por la presencia de yeso y otros materiales. Además, en los materiales terciarios que rellenan la cuenca de Vera, la presencia de evaporitas es, también, frecuente asociada a lechos de 5-10 m de espesor (Stokes, 2008). Estos datos y los de isótopos estables de las aguas termaleras sugieren que las aguas profundas pueden estar controladas por una combinación de disolución de halita además del efecto de la dilución por aguas meteóricas durante los períodos de lluvia y una cierta infiltración de agua de mar en el área costera (Navarro y Carulla, 2018).

Por otro lado, distintos trabajos realizados sobre el terreno muestran una evolución de la temperatura en profundidad algo distinta de la existente en campos geotermales muy activos, pudiendo evaluarse el gradiente geotermal en 6.75°C/100 m. El funcionamiento del sistema, en función de los datos existentes, se podría explicar por la infiltración de aguas frías en zonas de topografía alta y de agua marina en menor proporción, desde el borde de S. Almagrera hacia un hipotético foco térmico situado a unos 2.000-3.000 m de profundidad bajo el nivel del mar, y un ascenso de las aguas termaleras

por la red de fracturación de las rocas metamórficas (Navarro y Carulla, 2018).

También se han empleado diversos geotermómetros (Navarro y Carulla, 2018) utilizando la composición química de las muestras más representativas (Tabla 5), a fin de evaluar la posible temperatura del foco térmico de Sierra Almagrera. Los geotermómetros químicos se basan en el equilibrio agua-roca dependiente de la temperatura y proporcionan la última temperatura del equilibrio agua-roca alcanzado en el acuífero (Nicholson 1993). No obstante, la aplicación de algunos geotermómetros a aguas mezcladas o aguas parcialmente equilibradas puede producir resultados poco fiables (Navarro et al., 2011).

Los geotermómetros de sílice se basan en la solubilidad dependiente de la temperatura de varios minerales del grupo de la sílice, y los resultados calculados están por debajo de las temperaturas detectadas en las muestras de agua termal. El uso de cuarzo y calcedonia, que son minerales saturados o cercanos al equilibrio (calcedonia), puede producir temperaturas probables, sin embargo, estos cálculos deben considerarse con precaución, ya que la solubilidad

Muestra	T ° C (in situ)	Cuarzo ^a	QSL ^b	K/Mg ^c	Na/Li ^d	Na/k ^e	Na/k ^f	Na-k-Ca ^g
A4	33.0	34	43	48	186	129	168	166
A5	33.0	26	35	48	191	139	177	171
A6	33.0	34	43	49	196	131	170	165
A7	33.0	14	24	50	191	121	162	160
A8	35	14	24	46	203	153	189	197
A9	34	14	24	47	210	153	189	195
A10	34	14	24	46	207	156	192	198
A11	34	14	24	49	210	139	177	185
A12	30	14	24	62	210	113	155	169
A13	28	14	24	61	208	114	156	173
A14	32	14	24	60	211	111	153	170
A15	32	14	24	57	206	130	169	187
A18	32	43	51	49	223	162	196	179
A19	32.5	48	55	48	213	160	195	180
A20	35	10	20	63	223	181	212	185
A21	46	-	8	54	132	49	98	136
A22	44.5	-	8	47	215	163	197	192
A23	46.5	5	15	36	201	159	194	203
A24	51	50	57	32	192	139	177	193
A25	51	45	52	32	193	140	178	193
A38	51	53	60	32	195	144	181	196
A44	51	-	-	32	206	167	200	205

^a Geotermómetro de cuarzo (Fournier, 1977), ^b Geotermómetro de cuarzo con pérdida de vapor (Fournier, 1977), ^c Geotermómetro de K/Mg (Giggenbach, 1988), ^d Geotermómetro de Na/Li (Kharaka et al., 1982), ^e Geotermómetro de Na/ K (Truesdell, 1976), ^f Geotermómetro de Na/ K (Fournier, 1979), ^g Geotermómetro de Na- K-Ca (Fournier and Truesdell, 1973).

Tabla 5. Temperatura de las aguas termales obtenida a partir de los distintos geotermómetros químicos empleados. Modificado de Navarro y Carulla (2018).
 Tabla 5. Temperatura de las aguas termales obtenida a partir de los distintos geotermómetros químicos empleados. Modificado de Navarro y Carulla (2018).

de la sílice puede estar controlada por la sílice amorfa en sistemas de baja temperatura (Fournier 1977) y la sílice amorfa está claramente subsaturada en estas aguas termales. Además, los resultados asociados a bajas temperaturas podrían estar relacionados con el enfriamiento y / o la mezcla durante el flujo hacia la superficie.

El geotermómetro empírico Na-K indica unas temperaturas para las muestras consideradas de entre 111 y 212°C con la excepción de la muestra A21, asociada a un antiguo pozo de la mina que puede reflejar una mezcla con aguas superficiales frías (Tabla 3). El geotermómetro Na-K-Ca es un indicador de temperatura que no proporciona resultados altos y engañosos para las aguas termales de baja temperatura (Porowski y Dowgiallo 2009). Los resultados obtenidos muestran temperaturas entre 160

y 205 °C, excepto la muestra A21, para las muestras más representativas (Tabla 5).

En cualquier caso, las muestras termales procedentes del pozo experimental (Tabla 4) muestran las temperaturas más elevadas y son, posiblemente, las más representativas del equilibrio en la mayor parte del yacimiento termal. En base a estos datos podrían estimarse unas temperaturas medias en el yacimiento geotérmico del orden de 190°C para las aguas equilibradas. Por otro lado, el uso del geotermómetro Na-Li también puede ser útil para predecir las temperaturas del foco, incluso podría ser más aproximado que algunas relaciones de equilibrio que involucran cuarzo, carbonatos o feldespatos. Los resultados obtenidos proporcionan valores de entre 180 y 223 °C, con una temperatura media de aproximadamente 201°C (Tabla 5).

CONCLUSIONES Y POSIBLE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS

Los análisis químicos de los fluidos geotérmicos indican una facies dominante clorurada sódico-cálcica, con un contenido de cloruros que alcanza 59,3 g / l, muy por encima de los valores detectados en el mar Mediterráneo. Las aguas termales muestran también concentraciones muy altas de Na (28 g / L), K (1.7 g / L), Ca (7.2 g / L), Mg (0.63) g / L y Li (65 mg / L). Además, se han detectado concentraciones elevadas de metales en las aguas de los pozos de algunas minas, que muestran concentraciones elevadas de Fe (1990 mg / L), Mn (600 mg / L), Zn (460 mg / L), Pb (4 mg / L) y Ni (11.4 mg / L).

El funcionamiento del sistema geotérmico, se podría explicar por la infiltración de aguas frías en zonas de topografía alta y de agua marina en menor proporción, desde el borde de S. Almagrera hacia un hipotético foco térmico situado a unos 2000-3000 m de profundidad bajo el nivel del mar, y un ascenso de las aguas termales por la red de fracturación de las rocas metamórficas.

En relación con el posible aprovechamiento geotérmico de estos fluidos y utilizando la densidad del agua subterránea salina a 190 °C, una capacidad calorífica de $4.46 \cdot 10^3$ J / kg·K y un caudal de 0.176 m³/s, equivalente al caudal histórico del sistema de desagüe de Sierra Almagrera, la potencia térmica de un pozo de producción individual podría alcanzar un máximo de 120.8 MW. Teniendo en cuenta los rendimientos habituales de las posibles centrales geotérmicas y las características hidrogeológicas del sistema geotérmico de Sierra Almagrera podría plantearse la explotación del sistema por varias plantas geotérmicas tipo "flash", con una potencia de 21.1 MW para cada planta. Todo ello usando una fracción de vapor del 25%, una eficiencia para cada turbina del 85% y una eficiencia eléctrica del 90%. Por todo ello y considerando una temperatura media del depósito geotérmico de alrededor de 190°C y una profundidad de extracción de los pozos de unos 2400-3000 m, podría considerarse al sistema geotérmico de Sierra Almagrera como un recurso geotérmico de posible interés económico.

Por último y dadas las características de los fluidos geotermales, también podría plantearse su utilización en un posible balneario, ya que las temperaturas de los fluidos captados en el antiguo desagüe de El Arteal son similares a los de otras instalaciones balnearias españolas. De hecho, cuando funcionaba el desagüe minero llegó a implantarse un pequeño balneario que era muy popular en toda esta comarca.

REFERENCIAS

- Agricola, G. 1556. *De Re Metallica*. Traducción de H.C. Hoover y L.H. Hoover. Londres 1912, 641 pp.
- Barragán, G. 1993. El encuadre geológico del término municipal de Cuevas del Almanzora. En: *Recursos naturales y Medio Ambiente de Cuevas del Almanzora*, IEA, Almería, 131-149.
- Booth-Rea, G., Azañón, J.M., Azor, A., García-Dueñas, V. 2004. Influence of strike-slip fault segmentation on drainage evolution and topography. A case study: the Palomares Fault Zone (southeastern Betics, Spain). *Journal of Structural Geology*, 26, 1615-1632.
- Camprubí, A., Albinson, T. 2006. Los depósitos epitermales: revisión sobre el estado actual de su conocimiento, métodos de estudio y presencia en México. En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen conmemorativo del centenario yacimientos minerales*, tomo LVII (4), México.
- Cuadrado, J. 1947. Almizaraque, la más antigua explotación de plata de España. 2º Congreso Arqueológico del Sudeste Español, Albacete, 1946-47, 168-185.
- De Sierra, A. 1928. *Los Hierros de Almería y Granada*. Memorias I.G.M.E., Vol. V, Tomo 3, 657 pp.
- Ezquerro del Bayo, J. 1844. *Datos y observaciones sobre la industria minera*. Madrid.
- Falces, A. 1883. Memoria historial y descriptiva de Sierra Almagrera. *El Minero de Almagrera*. Cuevas.
- Ferré, E. 1979. *El Valle del Almanzora. Estudio Geográfico*. Edición conjunta de la Caja Rural Provincial, Diputación Provincial y M. P y Caja de Ahorros de Almería.
- Fournier, R.O. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier, R.O., Truesdell, A.H. 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 1255-1275.
- Fournier, R.O. 1979. A revised equation for the Na-K geothermometer. *Trans.-Geotherm. Resour. Counc.*, 3, 221-224.
- Giggenbach, W.F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Gómez Iribarne, B. 1908. Desagüe de Sierra Almagrera. *Revista Minera*, 142-149.
- INI 1952. Minas de Almagrera S. A. *Revista de Información del Instituto Nacional de Industria*. Año VI, Nº 1, pp. 1-11.
- Kharaka, Y.K., Lico, M.S., Law-Leroy, M. 1982. Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *AAPG Bulletin*, 66, 588.
- Martínez, J., García Guinea, J., López Ruiz, J.A., López García, J., Benito, R. 1989. Las mineralizaciones epitermales de Sierra Almagrera y de la cuenca Sedimentaria de Herrerías, Cordilleras Béticas. *Boletín Sociedad Española Mineralogía*, 12, 261-271.
- Martínez, J. 1991. Sulphide and sulphosalt mineralogy and paragenesis from the Sierra Almagrera veins, Betic Cordillera (SE Spain). *Estudios geológicos*, 47, 271-279.
- Navarro, A., Viladevall, M., Font, X., Rodríguez, P. 1994a. Las mineralizaciones auríferas de Sierra Almagrera (Almería). Estudio geoquímico y modelos de yacimientos. *Boletín Geológico y Minero*, 105-1, 85-101.
- Navarro, A., Virto, L. 1994b. Fundamentos básicos de la modelización de sistemas hidrotermales. Aplicación teórica al sistema Almagrera-Herrerías. Geología y Metalogenia en ambientes oceánicos. Depósitos Hidrotermales Submarinos. *Publicaciones Especiales I. E. O.*, nº 18, 39-51.
- Navarro, A. 1997. Modelización teórica del transporte de vapor de mercurio a partir de zonas mineralizadas: Aplicación a la localización de yacimientos epitermales. En: García-Rossell, L. y Navarro, A. (Ed.), *Recursos Naturales y Medio Ambiente en el SE Peninsular*, IEA, 307-320.
- Navarro, A., Collado, D., Font, X., Viladevall, M. 1997. Geoquímica de las mineralizaciones auríferas de Sierra Almagrera (Almería, España). En: García-Rossell, L. y Navarro, A. (Ed.), *Recursos Naturales y Medio Ambiente en el SE Peninsular*, IEA, 321-333.
- Navarro, A., Collado, D., Sánchez, J.A. 1998. Análisis de la contaminación por actividades mineras de los suelos de la cuenca baja y delta del río Almanzora. *Boletín Geológico y Minero*, 109, 69-87.
- Navarro A., Collado D., Carbonell M., Sánchez J.A. 2004. Impact

- of Mining Activities in a semi-arid environment: Sierra Almagrera district, SE Spain. *Environmental Geochemistry & Health*, 26, 383-393.
- Navarro, A., Cardellach, E., Mendoza, J.L., Corbella, M., Domènech, L.M. 2008. Metal mobilization from base-metal smelting slag dumps in Sierra Almagrera (Almería, Spain). *Applied Geochemistry*, 23, 895-913.
- Navarro, A., Cardellach, E. 2009. Mobilization of Ag, heavy metals and Eu from the waste deposit of Las Herreras mine (Almería, SE Spain). *Environmental Geology*, 56, 1389-1401.
- Navarro, A. 2010. El desagüe minero de Sierra Almagrera: 100 años de lucha contra el agua. *Axarquía*, 15, 131-144.
- Navarro, A., Font, X., Viladevall, M. 2011. Geochemistry and groundwater contamination in the La Selva geothermal system (Girona, Northeast Spain). *Geothermics*, 40, 275-285.
- Navarro, A., Carulla, N. 2018. Evaluation of Geothermal Potential in the Vicinity of the Flooded Sierra Almagrera Mines (Almería, SE Spain). *Mine Water and the Environment*, 37 (1), 137-150.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration techniques*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Sánchez Picón, A. 1983. *La Minería del Levante Almeriense: 1838-1930. Especulación, Industrialización y Colonización Económica*. Editorial Cajal, Almería, 308 pp.
- Sánchez Picón, A. 1992. *La integración de la economía almeriense en el mercado mundial (1778-1936)*. Instituto de Estudios Almerienses, Diputación de Almería, 573 pp.
- Siret, L. 1907. *Villaricos y Herreras. Antigüedades Púnicas, Romanas, Visigóticas y Árabes. Memoria Descriptiva e Histórica*. Edición facsimil, Mariarsa Ed.; Madrid 1985, 102 pp.
- Souviron, R. 1898. *El desagüe de Sierra Almagrera*. Revista Minera Metalúrgica y de Ingeniería. pp. 1716.
- Stokes, M. 2008. Plio-Pleistocene drainage development in an inverted sedimentary basin: Vera basin, Betic Cordillera, SE Spain. *Geomorphology*, 100, 193-211
- Truesdell AH 1976. Summary of section III: Geochemical Techniques in Exploration. En: *Proceedings of Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*. San Francisco, 1975 vol. 1, U.S. Government printing Office, Washington D.C.
- Younger, P. L., Banwart, S. A. & Hedin, R. S. 2002. *Mine water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 442 pp.